



GÁSPÁR MERSE ELŐD

GÖMBHÉJAK ÉS HÉJRENDSZEREK  
DINAMIKÁJA ÉS ALKALMAZÁSUK  
AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLETBEN

TÉZISFÜZET

TÉMAVEZETŐ: RÁCZ ISTVÁN



2012, BUDAPEST



## Bevezetés

Az általános relativitáselmélet keretein belül kétféle szakadási felületet szokás megkülönböztetni. Abban az esetben, amikor a sűrűségnek véges ugrása van, határfelületről beszélünk, ilyen például egy csillag felszíne, vagy ez a helyzet egy lökéshullám esetén. Amikor pedig a sűrűség végtelenné válik, infinitezimálisan vékony héjról beszélünk, amely véges felületi energiasűrűséggel rendelkezik. Ez utóbbi eset, infinitezimalitása miatt, természetesen egy idealisztikus határeset, amely a fizikai valóságban precízen véve nem létezik, mégis egy nagyon jól használható modell. Például ennek segítségével tetszőleges egzakt megoldásokat illeszthetünk össze, és az egzakt megoldásoknak különösen fontos szerepe van az általános relativitáselméletben, amely egy erősen nemlineáris négydimenziós elmélet, ezért a numerikus számolások rendkívül erőforrás igényesek. Dolgozatomban ez utóbbi, infinitezimálisan vékony héjak, és különös tekintettel a sok héjból álló héjrendszerek dinamikáját írom le és tanulmányozom analitikusan és numerikusan az időszerű esetre korlátozódva. Ugyanakkor megjegyzem, hogy a formalizmus magába foglalja az előbbi ún. határfelületek tárgyalását is, azonban disszertációmban a héjak gyakorlati alkalmazásaira fókuszálok.

Gömbhéjak alkalmazását megtaláljuk a részecske modellektől kezdve az asztrofizikai rendszereken át egészen az Univerzumot leíró modellekig, és az alkalmazások száma meglehetősen nagy az irodalomban. Csak címszavakban említenék meg néhányat ezek közül. Töltött héj alkalmazható, mint elektronmodell, elkerülendő a negatív gravitációs tömeg megjelenését, amely a töltésnek a centrumba koncentrálódása miatt megjelenik más modellekben. A gömbszimmetrikus héjak mozgása leírható egyetlen effektív radiális potenciállal, ezért kvantálásuk kézenfekvő, és ezáltal közelebb vezethet a gravitáció kvantálásához. Gömbhéjak gravitációs kollapszusa során érdekes szemi-klasszikus kvantum effektusok lépnek föl. Ki lehet mutatni például, hogy a valószínűségi eloszlás maximuma nem a centrumban van, vagy azt, hogy a Casimir erő meg tudja állítani a kollapszust. Különböző téridők összeillesztésével olyan egzotikus modelleket is konstruálhatunk, mint például a gravastar, amely egy alternatív fekete lyuk modell, vagy a féreglyukak melyeknek segítségével lehetővé válhat az időutazás. A héjmodellt kombinálva a hadronokat leíró zsákmodellel a kvark csillagok leírását lehet elemi szinten tárgyalni. A héjak különösen alkalmasak energetikai és stabilitási vizsgálatokra például fekete lyukak vagy szupernóvák esetében, illetve szingularitás vizsgálatokra, különös tekintettel az akusztikus szingularitás vizsgálatára, amely egyben disszertációm egyik fő témája is. De a héjak használatát megtaláljuk a kozmológiában is. Említhetjük például a korai Univerzumot modellező buborék inflációs modelleket, vagy a magasabb dimenziós brán-elméletek egész sorát. Bővebb összefoglaló található az irodalomról disszertációm bevezető fejezetében.

Az említett példákat tekintve megállapíthatjuk, hogy a vékony héjak alkalmazásainak a száma igen nagy. Azt is érdemes megjegyezni, hogy a különböző rendszerek dinamikája lényegében ugyanazokkal az egyenletekkel írható le. Annak ellenére azonban,

hogy gömbhéjak számos területen alkalmazhatók, és bonyolult folytonos problémákat is közelíthetünk diszkrét héjakkal, eddig még nem történt kettőnél több héjat tartalmazó rendszerek vizsgálata sem analitikusan sem numerikusan. Ugyancsak kevesen tárgyalták eddig a mozgás teljes leírását, beleértve héjak ütközése esetén az időfejlődés folytatását, illetve az eseményhorizonton való átmenetet és a fekete lyuk tartományban érvényes dinamikát. Ezidáig a héjakkal foglalkozó tanulmányok leginkább az analitikus leírásra korlátozódtak a legegyszerűbb homogén lineáris vagy por állapotegyenleteket feltételezve.

Doktori disszertációm a fent említett hiányosságok pótlására irányult, és ennek szellemében a doktori munkám jelentős része egy olyan gyors numerikus szoftver kifejlesztése volt, amellyel nagyszámú koncentrikus gömbhéj mozgása szimulálható a héjak közötti esetleges ütközések vagy áthatolások figyelembevételével. A héjakat alkotó anyag állapotegyenlete héjról-héjra tetszőlegesen választható. A programcsomag alkalmazásával számos jelenség vizsgálata vált lehetővé, amelyeket a tézispontokban összefoglalok. A programcsomag forráskódja szabadon letölthető a <http://sss.rmki.kfki.hu> weboldalról.

A bevezető első fejezet után, doktori disszertációm második fejezetében részletesen összefoglalom a vékony héj mozgásának elméleti hátterét, és kitérek az Eddington–Finkelstein koordinátákban való leírásra is, amelynek segítségével a mozgás a horizonton keresztül is folytatható. A harmadik fejezetben héjak ütközésének két speciális esetét, a transzparens áthatolást és a teljesen rugalmatlan ütközést vizsgálom és levezetem a szükséges egyenleteket. A negyedik fejezetben megmutatom, hogyan célszerű leírni héjak együttes rendszerét, és számos numerikus szimulációval vizsgálom az akusztikus szingularitás és a tömeg infláció jelenségét. Végül az utolsó fejezetben speciális alkalmazásként összefoglalom a gravastar egy egyszerűsített, de jól tanulmányozható modelljét, és ennek vizsgálom a stabilitását egy új módszerrel, analitikus és numerikus vizsgálatokat is beleértve. Ez utóbbi téma motivációjáról a gravastarról szóló fejezet bevezetőjében bővebben értekezek, itt csak annyit említenék meg, hogy az Univerzumban jelenleg mérhető gyorsulva tágulás és a sötét energia koncepciója miatt az alternatív fekete lyuk megoldások között a hipotetikus gravastar modell mostanában a figyelem középpontjába került. Ez az a téma amellyel eredetileg elkezdtem a vizsgálódásaimat téridők illesztésével kapcsolatban.

## A munka célkitűzései

Doktori munkám célkitűzése volt egy olyan hatékony numerikus programkód kifejlesztése, mellyel tetszőleges számú és állapotegyenletű héjak dinamikai fejlődése automatikusan szimulálható akár newtoni akár relativisztikus esetben a horizont alatt is az ütközések figyelembevételével. Mivel korábban két héjnál többet nem vizsgáltak sem analitikusan sem numerikusan, ezért olyan effektusok felfedezését vártam, különös tekintettel az akusztikus szingularitás jelenségével kapcsolatban, melyek korábban nem voltak vizsgálhatók. Különösen fontos ez azért is, mert folytonos modellben az akusztikus szingularitás fellépte esetében a mozgásleírás nem folytatható. A programot nem csak Schwarzschild-héjakra kívántam kifejleszteni, hanem de Sitter -vákumra is általánosítani kívántam, hogy speciális alkalmazásként vizsgálni tudjam a gravastarok héjmodelljét. A kifejlesztett aparátust a gravastarok stabilitás vizsgálatára kívántam alkalmazni.

## Alkalmazott módszerek

Gyakorlati szempontból a doktori munka legfőbb eredménye annak a C++ programkódnak a létrehozása, amellyel az alábbiakban is ismertetett numerikus eredményeket köszönhetjük. Ennek a programkódnak számos előnye van, amelyeket az alábbiakban foglalom össze. Természetesen a program megírásának feltétele volt az is, hogy a héjak dinamikája mellett, kidolgoztam a héjrendszerek megfelelő leírásának elméletét.

- A gyors numerikus számítást biztosítja, hogy a program C++ nyelven íródott. Ezen kívül különféle trükkökkel még gyorsítva is vannak a számítások. Ilyen trükk például, hogy bizonyos függvények kiértékelésénél az eredményt eltárolja a program a memóriában, ha arra a futás során később is szükség van. Ez azért lényeges technikai megoldás, mert a C++ objektum orientált nyelv, amelynek az előnyeit ki is használjuk, ez viszont többnyire azzal jár, hogy minden elemeire van bontva, és külön objektumként kezeljük, ezért a belső műveletek részeredményei elvesznek, ha nem vigyázunk, és csak a végeredmény őrződik meg, amikor egy objektum belső függvénye hívásra kerül.
- A programcsomag objektum orientált nyelven íródott, és a magja az a könyvtár, amely tartalmazza az egyes objektumokat, mint például az állapotfüggvény, a héj és a héjrendszer. A felhasználó ezeket az objektumokat akár külön-külön is használhatja. Az objektumok biztosítják, hogy könnyen áttekinthető a struktúra, és könnyebben lehet módosítani, akár csak egyes részleteit is. Más felhasználók akár tovább bővíthetik, például töltött héjakra is, vagy lecserélhetik az egyes numerikus algoritmusokat igényeik szerint. A könyvtárban egy szimpla kapcsoló lehetőséget ad arra, hogy Newton-, Schwarzschild- vagy Eddington-idő szerint fejlesszük a dinamikát.
- Az előző pontban említett könyvtár mellett, azonnal futtatható programok is helyet kaptak a programcsomagban, amelyekkel tetszőleges nagy rendszerek szimulálhatók newtoni vagy relativisztikus dinamika szerint. A programok a szimulandó héjrendszer adatait egy szöveges bemeneti adatfájlból olvassák be, amely egy szövegszerkesztővel könnyen módosítható. A kimeneti adatfájlba pedig a mozgást leíró adatsorok mellett megjegyzések is kerülnek, például az esetleges ütközések helyén az ütközés paraméterei is kiírásra kerülnek. A program meghívása során beállíthatjuk a numerikus felbontás pontosságát, azonban ettől függetlenül állítható be a kimeneti adatfájlba a lépésköz. A programcsomaghoz emellett számos segédprogram is tartozik. Például olyan, amelyik legyártja az eredményeket ábrázoló gnuplot scriptet. Ez különösen sok héj esetén lényeges. Illetve olyan program, amellyel vastag héjak közelítéséhez tudunk bemenő adatsorokat generálni, például egyenletes eloszlást.

A héjrendszerek leírásában lényeges az adatok ábrázolása is, amely egyfajta egyidejűség definiálását követeli meg a szomszédos héjak között, ugyanis a héjak két oldalán az időkoordináták ugrást szenvednek. Megvizsgáltam a numerikus algoritmus konvergenciáját. Sok héj esetén továbbá nehézkes az adatok ábrázolása, ezért bizonyos esetekben színeket és burkoló görbéket is használtunk, amelyek programozástechnikailag nem triviális megoldások.

A gravastarok stabilitásával kapcsolatos eredményeim a dolgozat utolsó fejezetében nagyrészen a gravastarok dinamikáját leíró effektív radiális potenciál vizsgálatára támaszkodnak. Az általános esetben numerikusan számolt potenciál vizsgálatát intervallum felezéssel megvalósított maximum és gyökkereső algoritmusokkal végeztem. Megjegyzem továbbá, hogy mivel a gravastar egy hipotetikus alternatív fekete lyuk modell, és nincsenek megfigyelhető illetve mérhető paramétereink a gravastarra vonatkozóan, ezért a gravastarok stabilitás vizsgálatánál a teljes paramétertartományt vizsgáltam, amely több dimenziós, ezért itt is fontos szerepe volt annak, hogy a vizsgálatokat végző programkód C++ nyelven íródott, amely alkalmas a gyors numerikus számítások elvégzésére.

## Tézisek

1. Gömbhéjak dinamikájával kapcsolatban dolgozatom függelékben részleteztem azokat a számításokat, amelyek az irodalomban csak hiányosan találhatók meg. A téridő külső-belső voltát jelző  $\epsilon_n$ , és az ettől teljesen független Schwarzschild-időnek a sajátidő szerinti deriváltjával kapcsolatos  $\epsilon_t$  előjelek szétválasztását tettem, amelyeket az irodalomban számos helyen összekevernek vagy megfelelnek róluk. Az utóbbival kapcsolatosan bevezettem a kritikus sugarat a horizont alatt, ahol az előjelváltás megtörténhet. Az egyensúlyban lévő Schwarzschild-héjak jellemzését adtam a paramétertérben. Carter–Penrose-diagrammal kapcsolatosan tettem néhány pontosítást, ugyanis az irodalomban gyakran ábrázolnak pontatlan Carter–Penrose-diagramokat. Egy héj Carter–Penrose-diagramja az időkoordináták ugrása miatt szigorúan véve nem ábrázolható síkban egy összefüggő diagrammal. Részletesen tárgyaltam a kezdőfeltételeket és a rájuk vonatkozó korlátozásokat. Számos állapotegyenlet típus esetén megadtam a héj mozgásának leírásához szükséges saját tömeget a sugár függvényében, többek között olyan bonyolultabb állapotegyenleteket is tárgyaltam, mint a politróp állapotegyenlet és a törött lineáris állapotegyenlet. Előbbinél fontos megjegyezni, hogy az irodalomban sok helyen nem a valódi politróp állapotegyenletre használják a politróp szót, ezt a dolgozatban részleteztem. A mozgás leírását megadtam Eddington–Finkelstein koordinátákban is, amelynek segítségével a mozgás a horizonton keresztül is folytatható. Összehasonlítóképpen pedig származtattam a newtoni leírást nem zérus nyomás esetére is.
2. A héjak ütközésével kapcsolatosan fontos megjegyezni, hogy bizonyos feltételezésekkel kell élnünk, hogy a mozgás folytatható legyen. Két határeset tárgyaltam, amelyek a héjformalizmuson belül is vizsgálhatók: a transzparens áthatolást és a rugalmatlan ütközés esetét. Előbbi egyenletei ismertek voltak az irodalomban, ugyanakkor a függelékben összefoglaltam az ide vonatkozó részletes számításokat. A rugalmatlan ütközés egyenletei azonban saját eredmények, amelyek közlésre is kerültek a *Probing the stability of gravastars by dropping dust shells onto them* című cikk függelékében.
3. Héjrendszerek leírásának elméleti kidolgozását adtam, és ennek az algoritmikus leprogramozása is eredményeim közé tartozik sokrétegű rendszerekre. Megjegyzem,

hogy itt nem csak a numerikus technika, hanem a sok héj együttes kezelésének elvi és algoritmikus megoldása is megoldandó volt. Schwarzschild héjak rendszeréről *On the dynamics of relativistic multi-layer spherical shell systems* címmel jelent meg cikkem, amelyben közlésre kerültek az alábbi eredmények. Sok héjból álló rendszerekkel elsősorban vastag héjak belső dinamikáját vizsgáltam. Különös tekintettel azt, hogy az ún. akusztikus szingularitás milyen esetben fordul elő. Fontos eredmény annak a megállapítása, hogy az akusztikus szingularitás, amely héjmodell esetén a fókuszálódásnak felel meg, egyenletes eloszlás esetén valósul meg, amely egy ideális szituáció, de amint eltérünk a szimmetriától és az egyenletestől eltérő konfigurációt választunk, a fókuszpontok diszperzálódnak. Rendre megvizsgáltam különböző paramétereit változtatva a kezdő adatoknak, és azt találtam, hogy akár a kezdő radiális eloszlást, a tömegeloszlást, vagy a sebességeloszlást változtatjuk meg, a rendszer diszperzálódik és a nem zérus nyomás is az akusztikus szingularitás mihamarabbi felbomlásához vezet. Ha pedig mindezeket egyszerre tekintjük véletlenszerűnek, például Gauss-eloszlással, akkor a fókuszálódáshoz tartozó oszcillációja a héj radiális diszperziójának már 100 héj esetében is jelentősen kisimul. Megvizsgáltam, hogy az egyenletes eloszlású rendszerben okozott piciny perturbációknak, mint amilyen egy rés vagy „anti-rés”, milyen a dinamikája. Azt találtam, hogy a radiális tömegközépponthez viszonyított relatív belső mozgás drasztikus mértékben és igen rövid időn belül megváltozik csupán 1%-os perturbáció esetében is. Kvalitatív megfigyeléseim, hogy a rés esetében a rés gyors kiszélesedését és kéregképződés jelenségét lehet megfigyelni a rés szélén, majd hosszú távon a kiszélesedett üreg „kifordulását”. Antirés esetén csomósodás figyelhető meg az antirés körül.

4. A horizont alatti tartományban is vizsgáltam a dinamikát, és ezzel kapcsolatosan a tömeginfláció jelenségét tanulmányoztam, amely kontinuum modellekben is megfigyelhető. A héjmodellben a tömeginfláció azt jelenti, hogy valamely köztes régió Schwarzschild tömegparamétere a kollapszus és az ütközések során a teljes rendszer tömege fölé nő és felrobban. Ez természetesen azt is jelenti, hogy valamelyik héj gravitációs tömege negatívvá válik, amely a kritikus sugár alatt történhet meg. A tömeg inflációval kapcsolatosan adtam egy analitikus felső becslést, amely aszimptotikusan illeszkedett a numerikus eredményekre, és megmutattam, hogy az eredmény nem függ érzékenyen a kezdő adatoktól.
5. Az egyensúlyi helyzetben lévő Visser és Wiltshire-féle gravastarok jellemzését adtam a paraméterterben. Fontos észrevétel, hogy a domináns energiafeltétel teljesülése esetén a legkisebb méretű gravastar sem lehet olyan kicsi, mint a legkisebb hagyományos csillagmodell, bár az eltérés csak pár ezrelék. Radiális dinamikai stabilitás vizsgálatot végeztem úgy, hogy szimuláltam a gravastar választ egy koncentrikus porfelhő ráejtése esetén. Ez egy új módszer, amely kvalitatív jellemzését adja a stabilitásnak. Számos állapotegyenlet esetén vizsgáltam a maximálisan ráejthető tömeget, és a maximálisan terhelt gravastar dinamikus tartományát. Azt kaptam, hogy a nem statikus gravastarok sem kerülhetnek beljebb, mint a klasszikus csillagmodellekre vonatkozó Buchdahl-limit. Sőt tetszőleges tetszőleges alternatív fekete lyuk modellről megmutattam, hogy az nem lehet a fekete lyuk alternatívája a klasszikus elméleten belül, ha határozott felszínnel rendelkezik.

## Következtetések

A sokrétegű héjmodell alkalmas a belső dinamikának a feltárására, akár a horizont alatt is, amelynek leírása más módszerekkel nem lehetséges vagy nehézkes. Legfőbb célom az volt, hogy sok héjból álló rendszerek viselkedését tanulmányozzam, amelyre eddig senkinek nem volt lehetősége. Így jobban megérthetjük a valódi vastag héjak dinamikáját is, és többek között az akusztikus szingularitás (shell-crossing) jelenségét. Ez a jelenség héjmodellben nem csak azt jelenti, hogy a héjak ütköznek egymással, hanem hogy az ütközések egy helyre fókuszálódnak. Azt találtam, hogy ez a fókuszálódás relativisztikus esetben kisebb mértékű, mint a newtoni esetben, azonban legfőbb eredményem, hogy a fókuszálódás felbomlik, ha megtörjük a szimmetriát a kezdő adatok homogenitásában.

Egy másik érdekes és keveset tanulmányozott jelenség, amelyet héj formalizmussal igen könnyen vizsgálhattam, a tömeg infláció jelensége. A tömeg inflációval kapcsolatos eredményem egy analitikus alsó becslés, amelyet numerikusan is igazoltam, és megmutattam, hogy az eredmény nem függ érzékenyen a kezdő adatoktól.

A gravastarokkal kapcsolatosan arra következtethetünk, hogy a gravastarok esetleges létezése sem zárja ki semmi esetre sem a fekete lyukak létét, sőt ez az állítás érvényes bármilyen alternatív fekete lyuk modellre is, amely modell az eseményhorizont létét el kívánja kerülni, és amelynek jól meghatározott felszíne van. Továbbá a gravastarok megfigyelésével kapcsolatosan megállapíthatjuk, hogy a lekompaktabb csillagokat nehezebb megkülönböztetni a fekete lyuktól, mint a legkompaktabb gravastarokat.

## Kitekintés

Elsőként jegyezzük meg, hogy a gyors C++ programcsomag segítségével számos más rendszer vizsgálata is elvégezhető, amelyek a bevezető fejezetben felsorolásra kerültek, hiszen a dinamikai egyenletek a felsorolt esetekben formálisan ugyanazok. Ha a dinamikában módosításra lenne szükség, az könnyen megtehető, hiszen a C++ forráskódok szabadon módosíthatók.

Doktori dolgozatom keretében három fő alkalmazással kapcsolatban értem el eredményeket. Elsőként az akusztikus szingularitást vizsgáltam sok héjból álló rendszerekkel. Ezek a vizsgálatok azonban por héj esetében adnak releváns eredményeket, hiszen nem lenne konzisztens feltételezni, hogy a részecskék között csak a felületre érintőleges kölcsönhatások hatnak, és radiálisan teljesen kölcsönhatás mentesen haladnak át egymáson. Érdemes lenne tehát a héjmodellt általánosítani radiális kölcsönhatás bevezetésével, illetve az ütközések típusát is általánosítani, hogy részlegesen transzparens ütközéseket is vizsgáljunk. A héjak kezdeti sebességeloszlását is tovább lehetne pontosítani összhangban a viriáltétellel. További érdekes kérdés, hogy a héjrendszerek belső relatív mozgása valóban kaotikus-e, és ha igen milyen értelemben és milyen Ljapunov-exponenssel? Ezen a téren elképzelhető, hogy a numerikus szimulációk mellett elméleti becsléseket is lehet adni. Hasonlóan érdekes kérdés, hogy az oszcillációk frekvenciáját meg lehet-e adni analitikusan, és vastag héj esetében ez mérhető-e bizonyos körülmények között egy valódi rendszerben. Vizsgálatok további tárgyát képezheti, ha vastag héjak mellett gömbhalmazokat is vizsgálunk a módszerrel.



Az eredmények másik része a tömeg infláció jelenségével kapcsolatos. Ezt a jelenséget kettőnél több héjből álló rendszer dinamikájával lehetne még behatóbban tanulmányozni. Elméleti megfontolásokkal összhangban a numerikus szimulációk is azt mutatják, hogy ilyenkor elsőként mindig a legbelső héj gravitációs tömege válik negatívvá. Úgy tűnik azonban, hogy mindig csak a belső héjnál lép fel az az anomália, és a külső héjak konvencionálisak módon viselkednek.

Az utolsó nagy terület, amelyet érintettem a gravastarok dinamikája, és stabilitásuk vizsgálata. A gravastar egy hipotetikus csillagmodell, amelynek stabilitását egyetlen porhéj ráejtésével vizsgáltam. A továbbiakban vizsgálható lenne a gravastarok időbeli fejlődése, amint a gravastar folyamatosan anyagot szippant magába. Egy ilyen folyamat gömbszimmetria esetén modellezhető por héjak egymás utáni ütközésével. Azt is érdemes lenne megvizsgálni, hogy mi történik, ha a beeső anyag nem teljesen rugalmatlanul ütközik, hanem egy része áthalad a gravastar kérgén. A gravastar egy hipotetikus modell, amely lehet, hogy a természetben nem létezik, lehetséges azonban, hogy az eseményhorizont elkerülésére nincs is szükség. Ettől függetlenül a centrumban fellépő görbületi szingularitás egy erősebb probléma, amely a klasszikus általános relativitáselméleten belül nem jól kezelhető. Világos, hogy a fellépő végtelen görbület csak akkor kerülhető el a klasszikus elméletben, ha a téridő de Sitter-szerűvé válik a központban. Ezen okfejtés alapján, amíg a kvantumgravitációnak nincs koherens elmélete, addig feltétlenül érdemes lenne megvizsgálni egy ilyen kicsi de Sitter buborék dinamikáját homogén sűrűségű anyagban, amely közelebb vihet a szingularitások megértéséhez.

# Publikációk

## Disszertációhoz kapcsolódó referált publikációk

- Gáspár Merse Előd és Rácz István:  
*Probing the stability of gravastars by dropping dust shells onto them*  
Classical and Quantum Gravity **27**, 185004 (2010)  
IF: 3.098
- Gáspár Merse Előd és Rácz István:  
*On the dynamics of relativistic multi-layer spherical shell systems*  
Classical and Quantum Gravity **28**, 085005 (2011)  
IF: 3.320

## Disszertációhoz nem kapcsolódó referált publikációk

- Kocsis Bence, Gáspár Merse Előd, Márka Szabolcs:  
*Detection rate estimates of gravity waves emitted during parabolic encounters of stellar black holes in globular clusters*  
The Astrophysical Journal **648**, 411 (2006)
- Gáspár Merse Előd és Csermely Péter:  
*Rigidity and flexibility of biological networks*  
Briefings in Functional Genomics, elfogadva (2012)
- Hegedűs Tamás és a többiek:  
*Potential application of network descriptions in the conformational changes and protonation states of ABC transporters*  
Current Pharmaceutical Design, elfogadva (2012)

## Egyéb nem referált publikációk

- Gáspár Merse Előd és Kocsis Bence:  
*The development of a digital camera with a high dynamic range*  
LIGO technical note LIGO-T030232-00-D (2003)
- Kocsis Bence és Gáspár Merse Előd:  
*The data analysis for short-term gravitational-wave burst signals with a modified maximum likelihood detection method*  
LIGO technical note P030011-00-Z (2003)
- Kocsis Bence és Gáspár Merse Előd:  
*Expectations on the gravitational wave signals associated with cosmic bremsstrahlung events*  
LIGO technical note LIGO-T030136-00-D (2003)

## Kollaborációs VIRGO publikációk 2010-ben

- *LIGO S6 detector characterization studies*  
Classical and Quantum Gravity **27**, 194010
- *Noise from scattered light in Virgo's second science run data*  
Classical and Quantum Gravity **27**, 194011
- *Data quality in gravitational wave bursts and inspiral searches in the second Virgo Science Run*  
Classical and Quantum Gravity **27**, 194012
- *Very low latency search pipeline for low mass compact binary coalescences in the LIGO S6 and Virgo VSR2 data*  
Classical and Quantum Gravity **27**, 194013
- *Tools for noise characterization in Virgo*  
Journal of Physics: Conference Series **243** 012004

## Doktori témával kapcsolatos előadások

- Fiatal Csillagász és Asztrofizikus Kutatók Találkozója  
előadás címe: *Gravastar – alternatív fekete lyuk?*  
Budapest, 2009. szeptember 2-4.
- akadémiai beszámoló  
KFKI RMKI, 2009. szeptember 5.
- ESI: Seminar on Mathematical Relativity  
Bécs, 2011. január 27-29.

Eötvös Lóránd Tudományegyetem, Fizika Doktori Iskola  
Iskolavezető: Dr. Csikor Ferenc egyetemi tanár  
Részecskefizika és csillagászat doktori program  
Programvezető: Dr. Csikor Ferenc egyetemi tanár  
Témavezető: Rácz István tudományos tanácsadó, MTA doktora